

文章编号:1673-9981(2022)02-0198-07

# 纳米 SiO<sub>2</sub>对混凝土性能影响的研究进展

赖祺<sup>1</sup>,李古<sup>2\*</sup>

(1. 广东工业大学土木与交通工程学院,广东 广州 510006; 2. 广州大学土木工程学院,广东 广州 510006)

**摘要:** 混凝土是土木工程中使用最为广泛的材料之一,当今普通混凝土已无法完全满足超限建筑业的需求,因此高性能纳米 SiO<sub>2</sub>改性混凝土应运而生。为更好地了解纳米 SiO<sub>2</sub>改性混凝土的各项性能,对其和易性、凝结时间、抗压强度和抗氯离子渗透性的研究进行了回顾和总结。相关研究表明:在混凝土中添加适量纳米 SiO<sub>2</sub>,可有效提高混凝土的抗压强度,且对早期抗压强度的影响大于后期的影响,但纳米 SiO<sub>2</sub>含量过高会使混凝土的抗压强度下降;适量的纳米 SiO<sub>2</sub>,还可以有效填充混凝土中的孔隙,改善其微观结构,提高混凝土的抗氯离子渗透性;然而,混凝土中掺入纳米 SiO<sub>2</sub>,会缩短其初凝时间和终凝时间,同时也会大幅影响混凝土的和易性,使之不利于长距离输送,增加施工难度。

**关键词:** 混凝土;纳米 SiO<sub>2</sub>;工作性能;力学性能;耐久性

**中图分类号:** TU503

**文献标志码:** A

**引文格式:** 赖祺,李古. 纳米 SiO<sub>2</sub>对混凝土性能影响的研究进展[J]. 材料研究与应用,2022,16(2):198-204.

LAI Qi,LI Gu. Progress of the Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> on Concrete Properties[J]. Materials Research and Application,2022,16(2):198-204.

随着世界经济蓬勃发展,建筑业的发展也进入快车道。一栋栋高楼大厦拔地而起的背后,伴随着的是混凝土的大量使用<sup>[1]</sup>。作为使用最为广泛的建筑材料,混凝土具有抗压强度高、弹性模量大及可塑性强等特点。随着建筑高度的不断提升,建筑业对混凝土性能的要求也愈发提高。普通混凝土的强度(抗压强度 10~60 MPa)已无法满足当今超限建筑的需求<sup>[2]</sup>,应运而生的是高性能混凝土(HPC,抗压强度 60~100 MPa)<sup>[3]</sup>,甚至是超高性能混凝土(UHPC,抗压强度 100~180 MPa)<sup>[4]</sup>。如坐落在广州的周大福金融中心(广州东塔),设计使用年限 100 年,建筑高度 530 m,总建筑面积约 50×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,所使用的混凝土强度高达 140 MPa(28 天),且泵送高度超 510 m<sup>[5]</sup>,这对混凝土的工作性能、力学性能和耐久性等都是极大的考验<sup>[6]</sup>。

纳米材料是指粒径介于 1~100 nm 的颗粒材料,其包括金属、非金属、有机、无机和生物等<sup>[7]</sup>,具有宏观物质材料所不具有的小尺寸效应、表面效应、量子

效应和宏观量子隧道效应等<sup>[8]</sup>。基于其所独有的纳米特性,纳米材料已在电子、化工、生物和医药等行业展现出广阔的应用前景。在混凝土中加入纳米材料可以有效提高混凝土的各项性能和微观结构,常见的有添加纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>以提高混凝土的电磁波吸收性能<sup>[9]</sup>,添加纳米 TiO<sub>2</sub>以增强混凝土的空气净化能力<sup>[10]</sup>,添加纳米 CaCO<sub>3</sub>以提高混凝土的强度与耐久性<sup>[11]</sup>等。不过,在混凝土生产中最常见和最重要的纳米材料还是纳米 SiO<sub>2</sub>,其是一种高纯无定形的白色蓬松粉末。根据亲水性的不同,纳米 SiO<sub>2</sub>可分为亲水性纳米 SiO<sub>2</sub><sup>[12]</sup>和疏水性纳米 SiO<sub>2</sub><sup>[13]</sup>,其中用于混凝土中的纳米 SiO<sub>2</sub>主要为亲水性纳米 SiO<sub>2</sub><sup>[14]</sup>,这主要是由于亲水性纳米 SiO<sub>2</sub>在水中分散性好。当纳米颗粒均匀分散在混凝土基体中时,水化过程中的产物聚集在以纳米 SiO<sub>2</sub>粒子为核心的纳米 SiO<sub>2</sub>周围,这更有利于水化产物的形成<sup>[15]</sup>。Ghafari 等<sup>[16]</sup>的研究表明,纳米 SiO<sub>2</sub>在水泥浆体中的分散程度,在很大程度上决定了混凝土的新拌性能和力学性

收稿日期:2021-10-18

基金项目:广东省自然科学基金项目(2021A1515011747);广东省普通高校特色创新项目(2017KTSCX061)

作者简介:赖祺(1994-),男,广东河源人,硕士研究生,主要研究方向为纳米改性水泥基材料,E-mail:laiqi0762@qq.com。

通信作者:李古(1986-),男,广东茂名,博士,副教授,主要研究方向为高性能混凝土,E-mail:ligu@gdut.edu.cn。

能。如果纳米 SiO<sub>2</sub> 无法有效分散, 则会使得纳米颗粒分散好的区域密实, 而纳米颗粒分散差的区域密实度差, 最终影响混凝土的整体强度。

为回顾业界学者对添加纳米 SiO<sub>2</sub> 的混凝土的相关研究, 对纳米 SiO<sub>2</sub> 改性混凝土的和易性、凝结时间、抗压强度及抗氯离子渗透性等性能进行总结及讨论, 对其各项性能有全面的了解。

## 1 和易性

塌落度和扩展度是新拌混凝土和易性的重要参考指标。现在建设项目, 尤其是超限建筑, 泵送高度

大, 如天津高银 117 大厦项目, 混凝土的最大泵送高度达 596.2 m<sup>[17]</sup>, 这对混凝土的和易性要求极高。

Steve 等<sup>[18]</sup> 通过研究发现, 在普通混凝土中分别添加质量分数为 2% 和 4% 的纳米 SiO<sub>2</sub>, 会使混凝土的塌落度相应降低 40% 和 60%。Zhang 等<sup>[19]</sup> 研究了不同纳米 SiO<sub>2</sub> 含量 (0, 1%, 3%, 5%, 7% 和 9%) 对掺 15% 粉煤灰的混凝土的塌落度的影响, 其结果如图 1 所示。从图 1 可见, 随着混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, 新拌混凝土的塌落度和扩展度大幅降低。当混凝土中的纳米 SiO<sub>2</sub> 掺入量为 9% 时, 与未掺纳米 SiO<sub>2</sub> 的混凝土相比, 塌落度降低约 78%, 扩展度也降低约 48%。

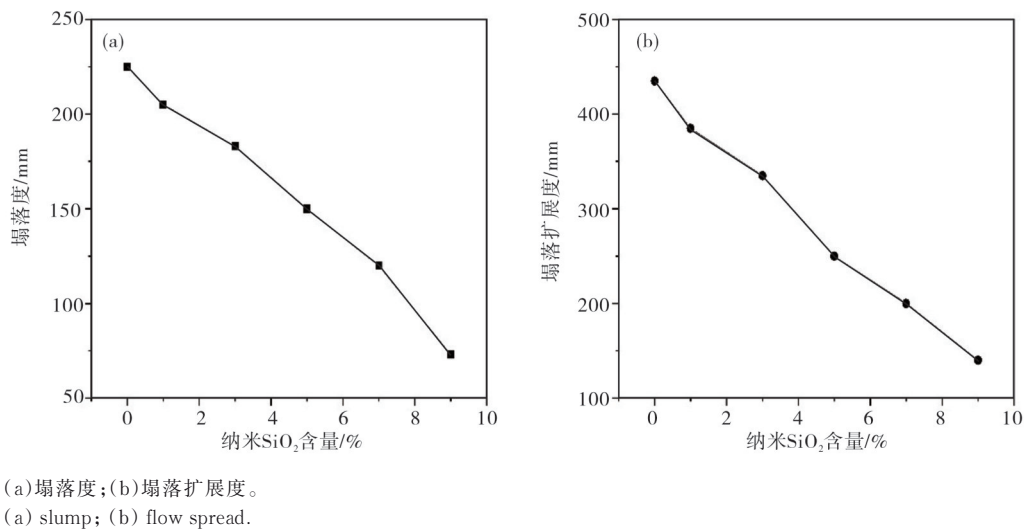


图 1 塌落度和扩展度

Fig. 1 Slump and flow spread

Bahadori 等<sup>[20]</sup> 的研究证明, 当减水剂和水胶比不变的情况下, 添加纳米 SiO<sub>2</sub> 会使混凝土的塌落度和扩展度大幅下降。Li 等<sup>[21]</sup> 的研究结果表明, 在水胶比为 0.4 的情况下, 为了保持同一水平的塌落度, 当纳米 SiO<sub>2</sub> 添加量为 1% 及 2% 时混凝土所需的减水剂剂量分别比空白组多 2.3 倍和 4.7 倍, 这也从侧面反映出添加纳米 SiO<sub>2</sub> 对混凝土流动性的影响。添加纳米 SiO<sub>2</sub> 造成混凝土流动性降低的可能原因如下: Givi 等<sup>[22]</sup> 认为, 纳米 SiO<sub>2</sub> 的高比表面积, 导致需要更多的水覆盖其表面, 从而降低和易性, 这一观点也与 Steve<sup>[18]</sup> 和 Beigi<sup>[23]</sup> 等的观点相同; 而 Berra 等<sup>[24]</sup> 则认为, 纳米 SiO<sub>2</sub> 会与水泥浆中溶解的碱产生瞬时的相互作用, 从而增加了拌合物的稠度。所以, 向胶凝混合物中添加纳米 SiO<sub>2</sub> 会显著降低混合物的和易性。

综上所述可知, 混凝土中掺入纳米 SiO<sub>2</sub>, 会大幅影响其和易性。故当混凝土有长距离泵送的要求

时, 应考虑是否增加减水剂用量, 调整砂率和骨料颗粒级配, 调整纳米 SiO<sub>2</sub> 的用量, 或同时添加其他有助于提高和易性的辅助胶凝材料, 如粉煤灰等<sup>[25-26]</sup>。

## 2 凝结时间

在大多位于城市中心或较为发达地区的建筑项目, 由于建设项目用地较小, 且为了保证混凝土的质量, 通常使用由工厂统一生产的商品混凝土, 这导致混凝土从工厂生产完成到运输至施工现场需要花费一定的时间。所以, 无论是普通混凝土还是高强混凝土, 其凝结时间成为一个重要的技术指标。如果混凝土初凝时间过短, 可能会导致混凝土未输送至指定区域就开始凝固, 导致无法使用。

Givi<sup>[27]</sup> 对混凝土的初凝和终凝时间进行了研究, 结果如图 2 所示。从图 2 可见, 随着混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, 混凝土的初凝和终凝时间都有

所缩短。当混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量达到 2% 时, 初凝时间及终凝时间分别比对照的混凝土缩短约 60% 和 45%。Pourjavadi<sup>[28]</sup> 和 Zhang<sup>[29]</sup> 等的研究与 Givi 的研究显示出同样的结论。

纳米 SiO<sub>2</sub> 粒子有较高比表面积, 意味着其具有较高的表面能。这是由于较小的颗粒尺寸会导致表面积迅速增加, 从而使表面中的原子数量迅速增加, 这些表面原子具有很高的活性和不稳定性, 从而导致反应速度加快, 缩短了凝结时间<sup>[27]</sup>。也有学者<sup>[30-31]</sup> 认为, 纳米材料的加入, 加速了硅酸三钙

(C3S) 和硅酸二钙 (C2S) 的水合作用, 从而加速 C-S-H 凝胶的形成, 从而缩短沉积物的凝结时间。

综上所述可知, 混凝土中掺入纳米 SiO<sub>2</sub> 会缩短初凝时间和终凝时间, 并且随着混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, 凝结时间缩短的幅度越大, 这会使施工难度增加。因此, 当对混凝土有凝结时间要求时, 如远距离运输, 应考虑采用降低混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量, 适当增加减水剂用量, 以及使用缓凝剂等手段<sup>[32-34]</sup>。

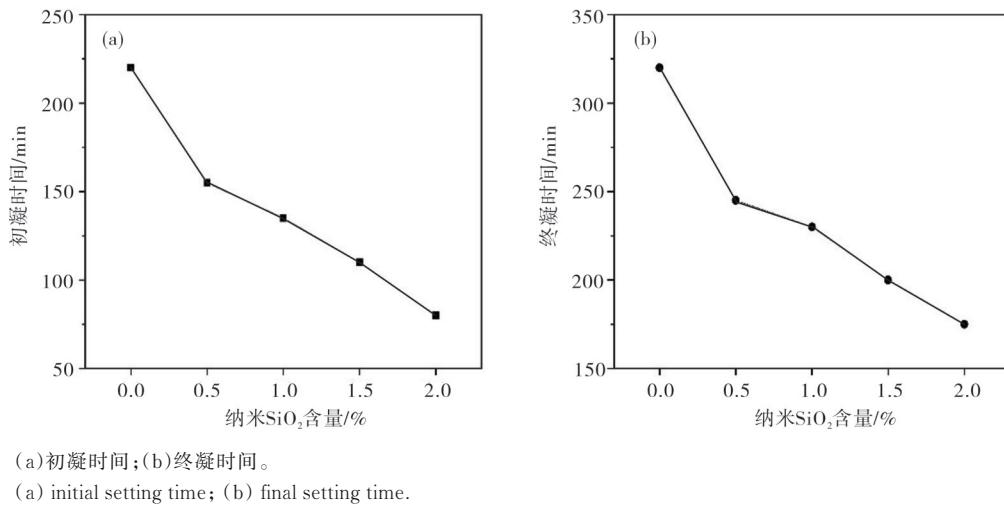


图2 初凝时间和终凝时间

Fig. 2 Initial setting time and final setting time

### 3 抗压强度

由于混凝土自身具有受压性能强、受拉性能弱的特点, 其通常作为一种受压材料而用于建筑结构中。因此, 提高混凝土的抗压强度, 将有效减少材料用量, 减轻结构自重, 节约成本和空间, 获得更好效益。添加纳米 SiO<sub>2</sub> 是提高混凝土抗压强度的常见方法之一。

叶青<sup>[35]</sup> 对混凝土抗压强度进行了研究, 在水胶比相同的前提下, 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量分别为 0%, 1.5% 和 3%, 三个样本记为 C0, N1 和 N2, 实验结果如图 3 所示。从图 3 可见: 在早期, 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 1.5% 的高强混凝土试样 N1 的抗压强度比空白对照试样 C0 的大约增加了 14%~25%; 在 28 天龄期, 其抗压强度增加约 8%; 而纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 3% 时, 高强混凝土试样 N2 的抗压强度比空白对照试样 C0 的大约增加了 20%~30%。由此可见, 在各龄期 N2 试样的抗压强度比 N1 的均有小幅度提高, 约为 4%~13%。Zhang 等<sup>[19]</sup> 发现: 当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量在 5% 以内时, 混

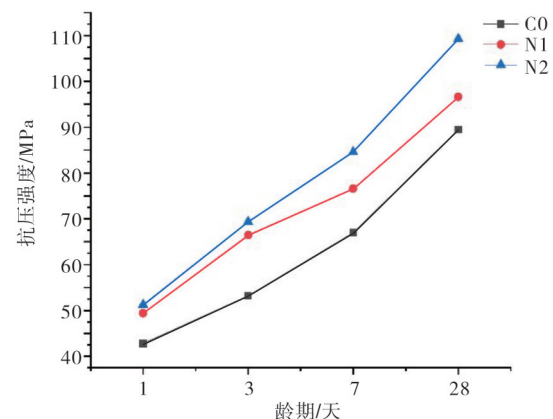


图3 抗压强度

Fig. 3 Compressive strength

凝土的抗压强度随着纳米 SiO<sub>2</sub> 的含量增加而增大; 当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量大于 5% 时, 混凝土的抗压强度随着纳米 SiO<sub>2</sub> 的含量增加而下降。Salemi<sup>[36]</sup> 等发现, 当混凝土中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 5% 时, 混凝土的抗压强度提高约 30%。Said<sup>[1]</sup>、Steve<sup>[18]</sup> 和 Li<sup>[37]</sup> 等的研究

结果表明,掺入纳米SiO<sub>2</sub>会对混凝土各龄期的抗压强度有不同程度的提高。

由于纳米SiO<sub>2</sub>粒径小,在浆体中均匀分散时能为水化产物提供大量成核中心,且纳米SiO<sub>2</sub>的高火山灰活性可以进一步促进水化过程<sup>[15]</sup>,其与氢氧化钙的火山灰反应促进水化硅酸钙的形成,这是混凝土抗压强度提高的主要原因。而没添加纳米SiO<sub>2</sub>的混凝土只能依靠水泥水化到少量的水合物硅酸钙。因此,在相同水胶比下,相比纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土,普通混凝土的抗压强度较低<sup>[38-39]</sup>。Jalal<sup>[40]</sup>和Abdellahi<sup>[41]</sup>等发现:纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土早期强度改善效果更明显,这是由于纳米SiO<sub>2</sub>颗粒火山灰活性较高且粒径较细,易于水化反应<sup>[42-45]</sup>;但随着时间的延长,用于火山灰反应的纳米SiO<sub>2</sub>颗粒逐渐减少,导致纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土后期抗压强度改善效果降低<sup>[46-52]</sup>。

此外,Li等<sup>[21]</sup>的研究表明,纳米SiO<sub>2</sub>导致混凝土强度提高的另一个重要原因是纳米SiO<sub>2</sub>的填充效应。因为纳米SiO<sub>2</sub>是纳米尺度的颗粒,在颗粒堆积体中可以填充水泥颗粒间的间隙,提高了混凝土堆积密实度,从而进一步提高了混凝土的强度。与传统矿物掺合料相比,纳米SiO<sub>2</sub>具有更小的粒径,在相同的质量掺量下颗粒的数量更多,能提供更多的成核中心。与其他纳米材料<sup>[53-54]</sup>相比,纳米SiO<sub>2</sub>具有更高的活性,能加速水化。同时,建议纳米SiO<sub>2</sub>与传统矿物掺合料配合使用,这可更好地发挥二者的协同填充作用<sup>[21]</sup>。

综上所述可知,掺入纳米SiO<sub>2</sub>在一定程度上可以提高混凝土的抗压强度,且对早期抗压强度的影响大于后期的影响,特别是在7天龄期前。混凝土的抗压强度并不是随着纳米SiO<sub>2</sub>含量的增加而持续提高,当超过某一阈值时,反而随着纳米SiO<sub>2</sub>含量的增加而下降,这个含量阈值大约为5%。对于纳米SiO<sub>2</sub>的使用,作者认为不应单独使用,而是应该与粒径更大的辅助胶凝材料(如硅灰和粉煤灰微珠等)复掺使用,这样不但可以利用二者的高火山灰反应特性,还可进一步提升整体的堆积密实度,以更好发挥协同效应<sup>[21]</sup>。

## 4 抗氯离子渗透性

由于混凝土材料本身的脆性特点决定了其抗拉强度低,所以钢筋混凝土结构中受拉或受弯构件通常由钢筋承担。而钢筋容易受到氯离子腐蚀而失效,因此,混凝土抗氯离子渗透性则显得尤为重要。

Said等<sup>[1]</sup>进行的快速氯离子渗透试验(rapid

chloride penetration test, RCPT)结果表明,在水泥中掺入3%和6%的纳米SiO<sub>2</sub>可显著改善混凝土的抗氯离子渗透性,其是通过减少水泥基体的孔隙结构来发挥作用的。Mohseni等<sup>[55]</sup>通过RCPT研究纳米SiO<sub>2</sub>对自密实混凝土渗透性的影响发现,5%的纳米SiO<sub>2</sub>掺量可产生最佳结果,可以明显减少通过试样的电荷。Du等<sup>[56]</sup>通过快速氯离子迁移试验(rapid chloride moving test, RCMT)发现,0.3%和0.9%的纳米SiO<sub>2</sub>替代率可以实现更好的分散,渗透深度和迁移系数均显著降低。Madani等<sup>[57]</sup>采用RCMT和RCPT方法研究了水溶胶纳米SiO<sub>2</sub>对混凝土的影响,结果表明,3%的纳米SiO<sub>2</sub>替代率对减少通过试样的电荷有轻微的影响。

氯离子在混凝土中的扩散路径主要有三种,即水泥浆中的连通孔隙、骨料中的连通孔隙、水泥浆与骨料间界面内的连通孔隙。由于纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土是在普通混凝土配合比基础上用纳米SiO<sub>2</sub>等量取代水泥,骨料中的连通孔隙没有变化,所以纳米SiO<sub>2</sub>混凝土抗渗性的改善主要在于水泥浆中连通孔隙及水泥浆与骨料间界面内连通孔隙的减少。纳米SiO<sub>2</sub>的掺入,通过以下方面改善了混凝土的抗氯离子渗透性:一方面,由于其颗粒小且数量多,为水化产物提供了较为分散的成核中心,并且反应活性大,促使水化反应产物如C-S-H凝胶变得更细<sup>[15,58-61]</sup>,从而填充了大量原有的缝隙;另一方面,未参与水化反应的纳米颗粒,由于其粒径小,可以有效填充较小的孔隙,从而进一步细化水泥浆体的孔隙结构,在界面过渡区也会减少传输通道,使得渗透率大幅降低<sup>[62-63]</sup>。

综上所述可知,在混凝土中加入纳米SiO<sub>2</sub>可有效填充混凝土中的缝隙和裂缝,改善其微观结构,从而提高混凝土的抗氯离子渗透性,有效保护钢筋混凝土结构构件中的钢筋不被氯离子锈蚀。相信随着纳米SiO<sub>2</sub>价格的不断下降,在不久的将来,在土木工程关键结构部位使用纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土是可行的。

## 5 结论

(1)在混凝土中添加纳米SiO<sub>2</sub>会导致和易性的降低。

(2)纳米SiO<sub>2</sub>的添加会导致混凝土的凝结时间大幅缩短。

(3)混凝土中添加纳米SiO<sub>2</sub>可以提高混凝土的抗压强度,且对早期抗压强度的影响更大。但混凝土的抗压强度并不是随着纳米SiO<sub>2</sub>含量的提高而

持续提高,当添加量超过某一阈值时,反而随着纳米SiO<sub>2</sub>含量的增加而下降。

(4)向混凝土中添加纳米SiO<sub>2</sub>可以有效降低其孔隙率,改善微观结构,从而提高混凝土的抗氯离子渗透性能。

#### 参考文献:

- [1] SAID A M, ZEIDAN M S, BASSUONI M T, et al. Properties of concrete incorporating nano-silica [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 838-44.
- [2] ZHANG P, WAN J, WANG K, et al. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 648-58.
- [3] ZHANG P, LI Q, ZHANG H. Fracture properties of high-performance concrete containing fly ash [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*, 2012, 226(L2): 170-176.
- [4] NGOC, THANH, TRAN, et al. Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2017, 78: 132-145.
- [5] 覃善总, 冯东亮, 辛福光. 多功能C120超高性能混凝土在广州东塔项目中超高泵送510 m的研发与应用[J]. *混凝土*, 2019(2):95-99.
- [6] OLAWUYI B J, BOSHOFF W P. Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135(15): 580-589.
- [7] 张立德. 我国纳米材料技术应用的现状和产业化的机遇[J]. *材料导报*, 2001, 15(7):2-5.
- [8] 冯春花, 王希建, 朱建平. 纳米材料在混凝土中的应用研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2013(8): 1557-1561.
- [9] MA G, ZHANG Y, LIU X. Electromagnetic wave absorption performance of magnesium phosphate cement functionalized by nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic fluid and hollow glass microspheres [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265:1-12.
- [10] GUO M Z, LING T C, POON C S. Nano-TiO<sub>2</sub>-based architectural mortar for NO removal and bacteria inactivation: Influence of coating and weathering conditions [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2013, 36(1): 101-108.
- [11] STEVE W, FAIZ U. Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes [J]. *ACT*, 2014, 12(6): 178-186.
- [12] 罗健辉, 杨洁, 李远洋. 双球状双亲纳米SiO<sub>2</sub>粒子的合成[J]. *高等学校化学学报*, 2018, 39(10): 68-75.
- [13] 冯守爱, 黄泰松, 邹克兴. 疏水纳米SiO<sub>2</sub>选择性降低卷烟烟气有害成分含量[J]. *烟草科技*, 2011(10): 5.
- [14] 丁向群, 徐佳伟, 尹思安. 纳米SiO<sub>2</sub>对水泥强度的影响[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2017(2): 106-112.
- [15] HUI L, XIAO H G, JIE Y, et al. Microstructure of cement mortar with nano-particles [J]. *Composites Part B*, 2004, 35(2): 185-189.
- [16] GHAFARI E, COSTA H, JULIO E, et al. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete [J]. *Materials & Design*, 2014, 59: 1-9.
- [17] 曲鹏翰, 张植伟, 张凤超. 天津高银117大厦混凝土超高泵送设备及泵管布置研究与应用[J]. *施工技术*, 2016, 45(7): 3.
- [18] SUPIT S, SHAIKH F. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica [J]. *Materials & Structures*, 2015, 48(8): 2431-2445.
- [19] PENG Z, YA NAN Z, QING FU L, et al. Mechanical properties of fly ash concrete composite reinforced with nano-SiO<sub>2</sub> and steel fibre [J]. *Current Science*, 2014, 106(11):1529-1537.
- [20] HADI B, PAYAM H. Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties) [J]. *Statyba*, 2012, 18(3): 416-425.
- [21] LI L G, HUANG Z H, ZHU J, et al. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 229-238.
- [22] GIVI A N, RASHID S A, AZIZ F, et al. The effects of lime solution on the properties of SiO<sub>2</sub> nanoparticles binary blended concrete [J]. *Composites*, 2011, 42B(3): 562-569.
- [23] BEIGI M H, BERENJIAN J, OMRAN O L, et al. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete [J]. *Materials & Design*, 2013, 50: 1019-1029.
- [24] BERRA M, CARASSITI F, MANGIALARDI T, et al. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of portland cement pastes [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 35: 666-675.
- [25] KWAN A K H, CHEN J J. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste [J]. *Powder Technology*, 2013, 234: 19-25.
- [26] SHAIKH F U A, SHAFAEI Y, SARKER P K. Effect of nano and micro-silica on bond behaviour of steel and polypropylene fibres in high volume fly ash

- mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 690-698.
- [27] GIVI A N. Investigations on the development of the permeability properties of binary blended concrete with nano-SiO<sub>2</sub> particles [J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(19): 1931-1938.
- [28] POURJAVADI A, FAKOORPOOR S M, KHALOO A, et al. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO<sub>2</sub> particles [J]. *Materials & Design*, 2012, 42: 94-101.
- [29] ZHANG M H, ISLAM J, PEETHAMPARAN S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34 (5) : 650-662.
- [30] ZHANG A, GE Y, YANG W, et al. Comparative study on the effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-NiO on hydration and microscopic properties of white cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 116767.
- [31] ZHANG S, QIAO W G, CHEN P C, et al. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212(10) : 10-18.
- [32] KHALID N H A, HUSSIN M W, ISMAIL M, et al. Evaluation of effectiveness of methyl methacrylate as retarder additive in polymer concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 449-456.
- [33] AREL H Ş, AYDIN E. Effects of Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, and Na<sup>+</sup> lignosulfonates on the behavior of fresh concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 1084-1091.
- [34] AREL H Ş. The effect of lignosulfonates on concretes produced with cements of variable fineness and calcium aluminate content [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 347-360.
- [35] 叶青. 掺纳米 SiO<sub>2</sub> 和掺硅粉高强混凝土性能的比较 [J]. *建筑材料学报*, 2003(4): 381-385.
- [36] SALEMI N, BEHFARNIA K. Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 48: 934-941.
- [37] LI G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(6): 1043-1049.
- [38] ZHIDAN R, WEI S, HAIJUN X et al. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 56: 25-31.
- [39] NAJI GIVI A, ABDUL RASHID S, AZIZ F N A, et al. Experimental investigation of the size effects of SiO<sub>2</sub> nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(8): 673-677.
- [40] JALAL M, POULADKHAN A, HARANDI O F, et al. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94: 90-104.
- [41] ABDELLAHI M, KARAFSHANI M K, RIZI A S. Modeling effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical properties of the concretes [J]. *Journal of Building Pathology & Rehabilitation*, 2017, 2(1): 8.
- [42] KHALOO A, MOBINI M H, HOSSEINI P. Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 113(15) : 188-201.
- [43] HORSZCZARUK E, SIKORA P, CENDROWSKI K, et al. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 420-431.
- [44] WANG X F, HUANG Y J, WU G Y, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175(30) : 115-125.
- [45] HEIDARI A, TAVAKOLI D. A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> particles [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 38: 255-264.
- [46] HOU P K, KAWASHIMA S, WANG K J, et al. Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35 (1) : 12-22.
- [47] BAGHERIA A, PARHIZKARB T, MADANI H, et al. The influence of pyrogenic nanosilicas with different surface areas and aggregation states on cement hydration [J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2013, 14(6): 783-796.
- [48] HOSSEINI P, BOOSHEHRIAN R, FARSHCHI R. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2141(1): 15-20.

- [49] BE HFARNIA K, ROSTAMI M. Effects of micro and nanoparticles of  $\text{SiO}_2$  on the permeability of alkali activated slag concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 131: 205-213.
- [50] NAJIGIVI A, KHALOO A, ZAD A I, et al. Investigating the effects of using different types of  $\text{SiO}_2$  nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete [J]. *Composites Part B Engineering*, 2013, 54: 52-58.
- [51] FLORENCE S, KONSTANTIN S. Nanotechnology in concrete- A review [J]. *Construction & Building Materials*, 2010, 24(11): 2060-2071.
- [52] QUERCIA G, HÜSKEN G, BROUWERS H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste [J]. *Cement & Concrete Research*, 2012, 42(2): 344-357.
- [53] MENG T, YU Y, QIAN X, et al. Effect of nano- $\text{TiO}_2$  on the mechanical properties of cement mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 241-245.
- [54] SIKORA P, HORSZCZARUK E, CENDROWSKI K, et al. The influence of nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  on the microstructure and mechanical properties of cementitious composites [J]. *Nanoscale Res Lett*, 2016, 11(1): 182-190.
- [55] MOHSENI E, MIYANDEHI B M, YANG J, et al. Single and combined effects of nano- $\text{SiO}_2$ , nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and nano- $\text{TiO}_2$  on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 84(1): 331-340.
- [56] DU H, DU S, LIU X. Durability performances of concrete with nano-silica [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 73(30): 705-712.
- [57] MADANI H, BAGHERI A, PARHIZKAR T, et al. Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing Nanosilica hydrosols with different specific surface areas [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2014, 53: 18-24.
- [58] YE Q, ZHANG Z, KONG D, et al. Influence of nano- $\text{SiO}_2$  addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume [J]. *Construction & Building Materials*, 2007, 21(3): 539-545.
- [59] JO B W, KIM C H, LIM J H. Characteristics of cement mortar with nano- $\text{SiO}_2$  particles [J]. *Construction & Building Materials*, 2007, 21(6): 1351-1355.
- [60] SENFF L, LABRINCHA J A, FERREIRA V M, et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars [J]. *Construction & Building Materials*, 2009, 23(7): 2487-2491.
- [61] GAITERO J J, CAMPILLO I, GUERRERO A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(8): 1112-1118.
- [62] 侯学彪, 黄丹, 王委. 掺纳米  $\text{SiO}_2$  高性能混凝土研究进展 [J]. *混凝土*, 2013(3): 5-9.
- [63] 韩文静, 宋进朝, 陶勇. 纳米改性地聚物材料影响混凝土性能应用研究 [J]. *材料研究与应用*, 2021, 15(3): 243-249.

## Progress of the Effect of Nano- $\text{SiO}_2$ on Concrete Properties

LAI Qi<sup>1</sup>, LI Gu<sup>2\*</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The nano- $\text{SiO}_2$  modified concrete (NSC) was applied in the field of limit-beyond high-rise building. For better understand the properties of NSC, the workability, setting time, compressive strength and chloride penetration resistance of NSC were reviewed and summarized. The previous researches showed that the compressive strength with an appropriate amount of nano- $\text{SiO}_2$  could be effectively improved, and the influence on the early compressive strength is greater than the long term one. nano- $\text{SiO}_2$  could also be filled in the concrete voids, improving microstructure and the chloride penetration resistance of concrete. However, the setting time of concrete with nano- $\text{SiO}_2$  reduced leading to unfavourable workability of concrete, which was not conducive to long-distance transportation and construction.

**Key words:** concrete; nano- $\text{SiO}_2$ ; workability; mechanical property; durability

(学术编辑:李艳辉)